

# DROHNEN-GESTÜTZTE UND TERRESTRISCHE WÄRME-BILDER

## ZUR BEURTEILUNG DER FLIESSGEWÄSSER-TEMPERATUR

**Terrestrische und drohnen-gestützte Messungen mit thermischem Infrarot (TIR) sind effektiv zur zeitlich-räumlich hochaufgelösten Quantifizierung von Längs- und Quertemperaturunterschieden in gut durchmischten Fließgewässern. Bei der TIR-Erfassung und -Analyse müssen allerdings verschiedene atmosphärische und andere Umwelteinflüsse berücksichtigt sowie die TIR-Anwendung zur genauen Bestimmung der absoluten Temperatur kritisch betrachtet werden.**

*Diego Tonolla\*, Forschungsgruppe Ökohydrologie, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen (IUNR), ZHAW; eQcharta GmbH*

*Johann Junghardt, Forschungsgruppe Geoinformatik, IUNR, ZHAW*

*Manuel Antonetti, Forschungsgruppe Ökohydrologie, IUNR, ZHAW*

*Michael Döring, Forschungsgruppe Ökohydrologie, IUNR, ZHAW; eQcharta GmbH*

### RÉSUMÉ

#### ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE DES COURS D'EAU AVEC DES IMAGES THERMIQUES PRISES SUR TERRE ET AVEC UN DRONE

Dans les cours d'eau à hydromorphologie complexe, la température de l'eau peut grandement varier selon le lieu et l'heure. Il est donc difficile de la quantifier sur l'intégralité du cours d'eau avec des méthodes *in situ* traditionnelles (p.ex. sondes thermiques). Les mesures par thermographie infrarouge (TIR; images thermiques) représentent ici une alternative efficace pour déterminer la température de rayonnement de l'eau de surface. Lors de cette étude, un drone a été utilisé pour prendre des images TIR le long d'un tronçon d'env. 750 m de la rivière Glatt en été 2018. Les images ont été réalisées le matin, à midi et l'après-midi trois jours différents. Ces images ont permis d'obtenir des orthophotographies TIR par photogrammétrie qui ont été validées ou corrigées des impacts environnementaux (atmosphériques ou autres), surtout avec des données de température issues de sondes *in situ*. Des analyses statistiques basées sur des systèmes de géoinformation ont servi à calculer les statistiques thermiques essentielles, les métriques de l'hétérogénéité des températures et les gradients thermiques. Des images TIR prises d'une caméra terrestre pendant deux jours sont venues compléter les images réalisées par le drone. Les résultats ont montré que les températures de rayonnement mesurées par la caméra terrestre et le

### EINLEITUNG

In hydromorphologisch komplexen Gewässern kann die Wassertemperatur hoch variabel in Zeit und Raum sein [1, 2] und ist daher mit herkömmlichen *In-situ*-Methoden (z. B. Temperatursonden) schwierig zu quantifizieren. Messungen mit thermischem Infrarot (TIR; Wärmebilder) stellen hier eine effektive Alternative dar. Jedes Objekt, dessen Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts (0K = -273,15 °C) liegt, sendet Wärmestrahlung aus. Die meisten TIR-Sensoren detektieren diese Infrarotstrahlung im Wellenbereich 3–5 und 7–14 µm, die von den obersten 50 µm Oberfläche eines Objektes emittiert wird [3]. Damit lässt sich auch die Strahlungstemperatur des Oberflächenwassers bestimmen. TIR wurde bereits vielerorts erfolgreich angewandt: um die räumliche Temperaturheterogenität von Fließgewässern und Auen zu bestimmen [2, 4, 5], Grundwasser-Oberflächengewässer-Interaktionen zu erfassen [6, 7], Warm- und Kaltwasserbereiche zu identifizieren [8, 9], thermische Modelle zu kalibrieren und zu validieren [10, 11] sowie den Erfolg von Renaturierungsprojekten zu überwachen [12, 13]. Allerdings sind keine Studien bekannt, welche die praktische Eignung von hochaufgelösten terrestrischen und drohnen-gestützten TIR-Bildern zur Beurtei-

\* Kontakt: [diego.tonolla@zhaw.ch](mailto:diego.tonolla@zhaw.ch); [tonolla@eqcharta.ch](mailto:tonolla@eqcharta.ch)

Variable	21.08.2018			22.08.2018			02.09.2018		
Uhrzeit erste und letzte Bildaufnahme sowie aufgenommene Daten	08:21– 08:37 MS	12:13– 12:25 MS	15:33– 15:42 MS						
	08:52– 09:03 TIR	12:32– 12:43 TIR	15:53– 16:04 TIR	08:49– 09:00 TIR	12:30– 12:41 TIR	15:50– 16:01 TIR	09:31– 09:41 TIR	13:02– 13:13 TIR	15:54– 16:06 TIR
	09:08– 09:20 MS	12:49– 13:02 MS	16:09– 16:20 MS	09:04– 09:18 MS	13:12– 13:25 MS	16:10– 16:30 MS	09:49– 10:01 MS	13:23– 13:39 MS	16:09– 16:21 MS
Drohnsystem	MS: Wingtra One™ TIR: ebee classic™								
Kameratyp und Wellenlänge	MS: MicaSense RedEdge™; 460–510 nm, 545–575 nm, 630–690 nm, 820–860 nm, 712–722 nm TIR: Thermomap™; 7,5–13,5 µm								
Auflösung Orthofotos (m)	MS: 0,09–0,10 TIR: 0,19–0,22								
Abfluss (m³/s) <sup>A</sup>	1,8	2,0	2,0	1,9	2,0	2,0	2,6	2,6	2,6
Globalstrahlung (W/m²) <sup>B</sup>	70	758	601	62	753	615	115	167	140

<sup>A</sup> BAFU-Messstation «Glatt-Rheinfelden»; <sup>B</sup> Gemessen mit einem Globalstrahlung-Pyranometer auf dem Dach der BAFU-Messstation (CPM 11, Kipp & Zonen, Niederlande; Quelle: BFH).

Tab. 1 Spezifikationen der Drohnenaufnahmen. TIR: thermische Infrarot-Aufnahmen; MS: Multispektrale Aufnahmen. Abfluss und Globalstrahlung gemittelt über die jeweilige TIR-Flugzeit.

lung der räumlich-zeitlichen thermischen Variabilität von Fließgewässern für ein Temperaturmonitoring und -management untersucht haben.

## METHODENBESCHREIB

### DROHNEN-GESTÜTZTE WÄRMEBILDER

Die TIR-Bilder wurden an drei verschiedenen Tagen, jeweils vormittags, mittags und nachmittags, im Sommer 2018 aufgenommen (Tab. 1), um die räumlich-zeitlichen Muster der Oberflächenwassertemperatur unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen (sonnig vs. bewölkt) entlang des ca. 750 m langen Untersuchungsabschnittes zu beurteilen (Fig. 1 im Leitartikel «Temperaturmonitoring Oberflächengewässer Schweiz», S. 37). Die dabei eingesetzte TIR-Kamera hat eine Temperaturempfindlichkeit (d. h. kleinste erkennbare Temperaturdifferenz) von 0,1 °C, die Messgenauigkeit wird vom Hersteller nicht angegeben.

Die TIR-Einzelbilder der jeweiligen Befliegungen wurden zu einem TIR-Orthofoto des Untersuchungsabschnittes zusammengesetzt (Software *Pix4D Mapper*) und auf der Basis von topografischen Merkmalen (GCP: *Ground Control Points*; extrahiert aus den gleichzeitig erfassten multispektralen Orthofotos) referenziert und co-registriert d. h. exakt übereinandergelegt (Fig. 1). Die multispektralen Orthofotos dienten dazu, eine Wassermaske der sichtbaren Wasserfläche zu erzeugen und somit sicherzustellen, dass für die weitere Analyse nur reine Wasserpixel (ohne Vegetations-, Sediment- und Mischpixel), verwendet wurden (Fig. 1). Ferner wurden 19 *In-situ*-Temperatur-

sonden (*Vemco Minilog II-T*, Auflösung 0,01 °C, Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  °C) einen Monat lang im untersuchten Abschnitt ausgelegt (Fig. 1, S. 37), um die mittels TIR abgeleiteten Strahlungstemperaturen zu validieren und zu korrigieren.

Folgende Korrekturschritte dienten dazu, die möglichen atmosphärischen und andere Umweltauswirkungen auf die TIR-Orthofotos zu berücksichtigen (Fig. 1):

- kleine Temperaturklassen (d. h. < 10 Pixel) wurden als nicht repräsentativ angesehen und daher verworfen.
- Pixel mit einer Temperatur über einem bestimmten Grenzwert wurden ebenfalls verworfen, da sie eindeutig nicht zu Wasserpixeln gehörten oder Artefakte enthielten.
- Alle Pixelwerte wurden mit einer linearen Beziehung zwischen der kinetischen Wassertemperatur ( $T_k$ ) aus den *In-situ*-Temperatursonden und den Strahlungstemperaturen ( $T_r$ ) aus den TIR-Orthofotos korrigiert [14, 15].

Die korrigierten TIR-Orthofotos wurden dann mit Hilfe der folgenden GIS-basierten (*ArcGIS 10.5.1*) und statistischen (*R Version 3.5.1*) Methoden analysiert (Fig. 1):

- sechs grundlegende Statistiken
- sieben Metriken der Temperaturheterogenität nach [16]
- thermische Gradienten entlang der ca. 750 m langen Flussmittellinie und entlang von 72 Quertransekten im Abstand von 10 m senkrecht zur Mittellinie

### TERRESTRISCHE WÄRMEBILDER

Die drohnen-gestützten Aufnahmen wurden mit TIR-Bildern einer terrestrischen Kamera (*FLIR t620*) ergänzt, aufgenommen an zwei Tagen (12.8. und 2.9.2018) zwischen 8 und 17 Uhr. Die Montage der TIR-Kamera erfolgte ca. 3 m senkrecht über der Wasseroberfläche und 1,5 m vom rechten Flussufer entfernt bei der BAFU-Messstation (Fig. 1, S. 37). Diese Kamera arbeitet im 7,5–14-µm-Wellenbereich,

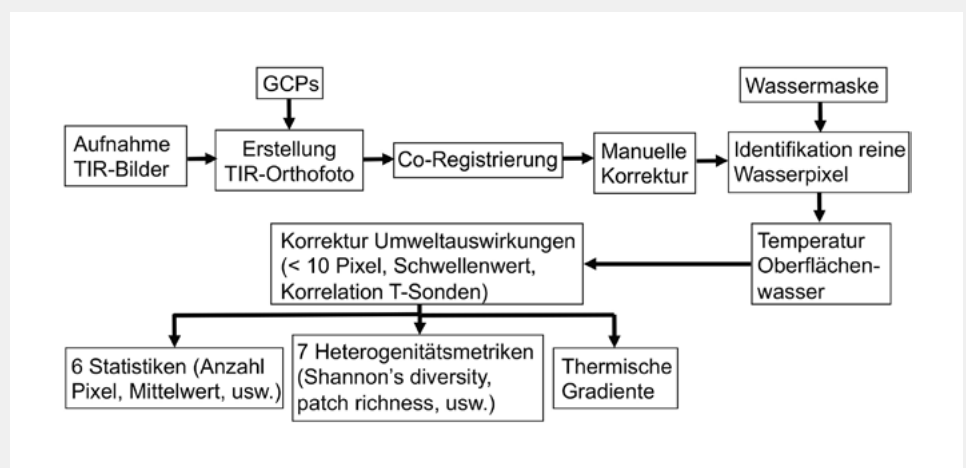


Fig. 1 Nachbearbeitungsablauf zur Temperaturanalyse der TIR-Bilder (Wärmebilder).



hat eine Temperaturempfindlichkeit von  $<0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$  und eine Messgenauigkeit von  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm <2\%$ ). Aus den im Minutentakt gespeicherten TIR-Bildern wurde die Temperatur des mittleren Bildpunktes (Pixel) extrahiert und mit der Wassertemperatur der nächstgelegenen *In-situ*-Temperatursonde verglichen.

## ERGEBNISSE

### RÄUMLICH-ZEITLICHE WASSERTEMPÉRATURVARIABILITÄT MIT DROHNEN-GESTÜTZTEN WÄRMEBILDERN

Die Messungen haben gezeigt, dass die drohnen gestützten Strahlungstemperaturen ( $T_r$ ) die *In-situ*-Temperaturmessungen

( $T_k$ ) überschätzen (v.a. mittags und nachmittags) oder unterschätzen (v.a. vormittags) können. Die höchste Überschätzung wurde für die Nachmittagsaufnahme des 22. August ermittelt, wobei  $T_r$  im Mittel  $5,1 \pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  wärmer war als  $T_k$ . Mit der Korrektur (s. *Methodenbeschreibung*) konnten die mittleren Differenzen zwischen  $T_r$  und  $T_k$  erheblich (ca.  $0,1 \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) reduziert werden. Allerdings blieben einige lokale Unterschiede bis zu  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  bestehen, was mit den Resultaten in mehreren anderen Studien übereinstimmt [z.B. 4, 5, 15].

Die korrigierten Temperaturdaten zeigten an beiden sonnigen Tagen eine deutliche tägliche Schwankung, während die Temperatur am bewölkten Tag gleichmässiger über die drei Tages-

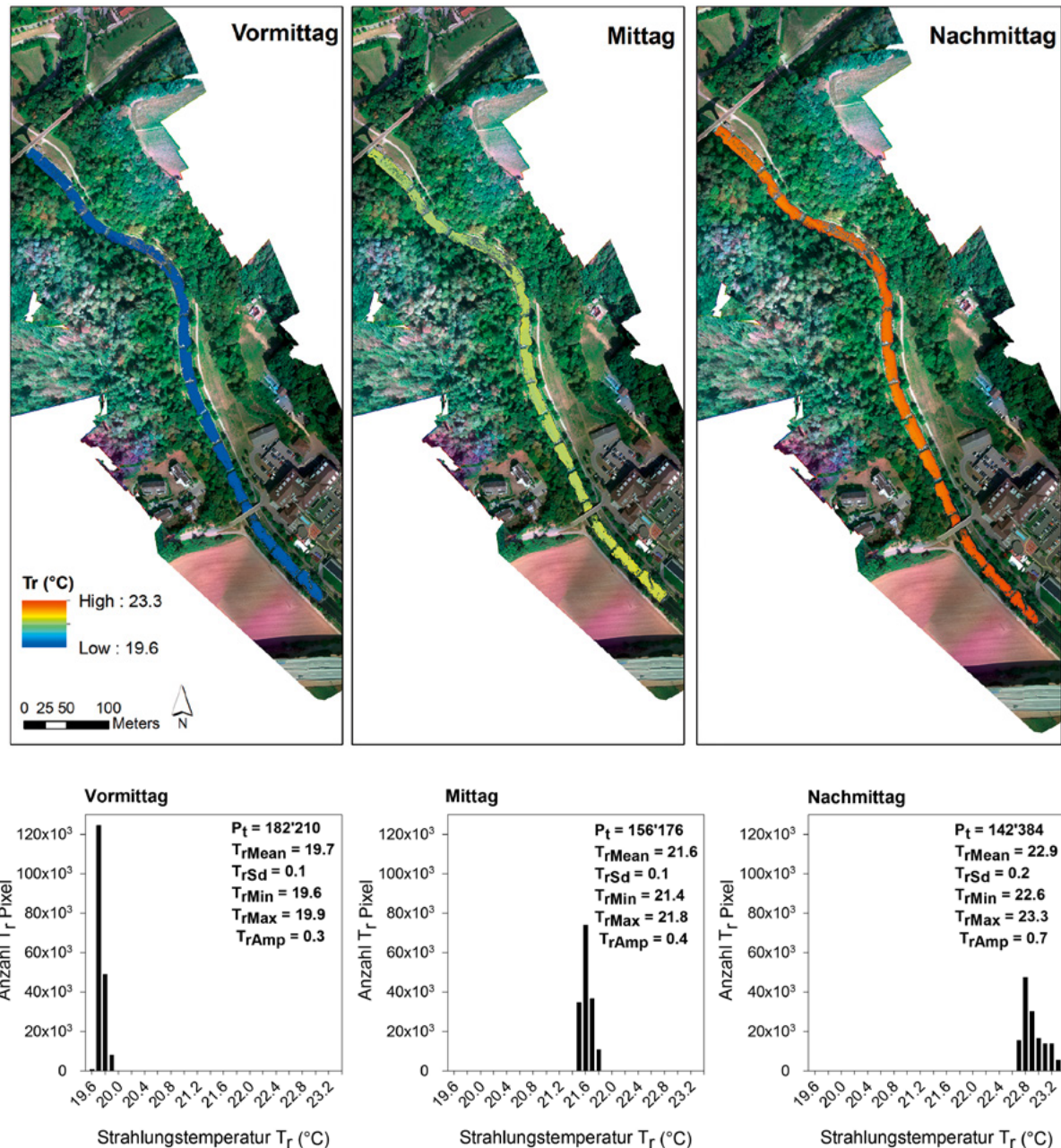


Fig. 2 Oben: Temperaturkorrigierte TIR-Orthofotos (räumliche Verteilung der Strahlungstemperatur [ $T_r$ ]; Werte pro Pixel) am Morgen, Mittag und Nachmittag des 21. August 2018 (sonnig). Die Fliessrichtung ist von Süden nach Norden. Hintergrundkarten: RGB-Orthofoto vom 21. August. Unten: Pixelfrequenzverteilung der entsprechenden TIR-Orthofotos mit sechs  $T_r$ -Statistiken: Gesamtanzahl der Pixel ( $P_t$ ), Mittelwert ( $T_{rMean}$ ), Standardabweichung ( $T_{rSd}$ ), Minimum ( $T_{rMin}$ ), Maximum ( $T_{rMax}$ ), Amplitude ( $T_{rAmp}$ ).

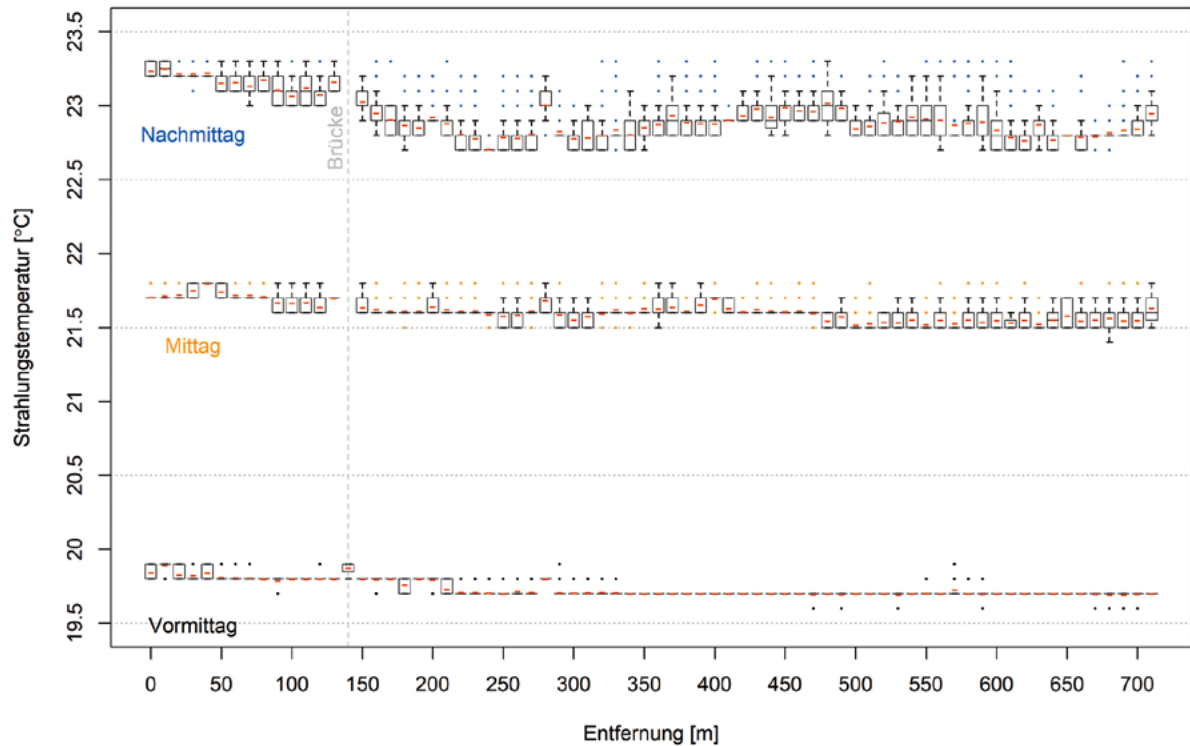


Fig. 3 Korrigierte Gradienten der Strahlungstemperatur ( $T_r$ ) am Morgen, Mittag und Nachmittag des 21. August 2018 (sonnig). Boxplots der Temperatur pro Pixel der 72 Quertransekte (im Abstand von 10 m) senkrecht zur ca. 750 m langen Flussmittellinie. Dargestellt sind die 25. und 75. Perzentile, der Median (schwarze Linie in der Box), Mittelwert (rote Linie in der Box), Whisker (25. Perzentil – 1,5. x Interquantilsabstand; 75. Perzentil + Interquantilsabstand) und Ausreisser (Punkte). Die Fließrichtung ist von links nach rechts. Siehe Fig. 2 oben für die entsprechenden TIR-Orthofotos.

aufnahmen verteilt war. Vom Morgen bis am Nachmittag des 21. August (sonnig) stiegen die mittlere  $T_r$  und deren Amplitude im gesamten Flussabschnitt um 3,2 °C bzw. 0,4 °C (Fig. 2), während am bewölkten Tag (2. September) nur eine Zunahme von 0,6 °C bzw. 0,1 °C gemessen wurde. Die  $T_r$ -Amplitude der einzelnen Aufnahmen reichte von 0 °C am Vormittag des 2. September bis 0,7 °C am Nachmittag des 21. August (Fig. 2).

An beiden sonnigen Tagen ergaben sich leichte Korrelationen ( $0,22 \leq r^2 \leq 0,69$ ) zwischen der Entfernung flussabwärts und einer sinkenden Temperatur entlang der Flussmittellinie. Darüber hinaus nahm die Temperaturvariabilität in den Quertransekten über den Tag zu (Boxamplitude in Fig. 3). Dieser longitudinale thermische Gradient könnte durch die flussaufwärts gelegene Kläranlage verursacht worden sein. Allerdings wurde dieser Trend durch die *In-situ*-Temperatursonden nicht bestätigt und die meisten Unterschiede lagen innerhalb eines möglichen TIR-Fehlers von  $\pm 0,5$  °C. Daher lässt sich ein flussabwärts gerich-

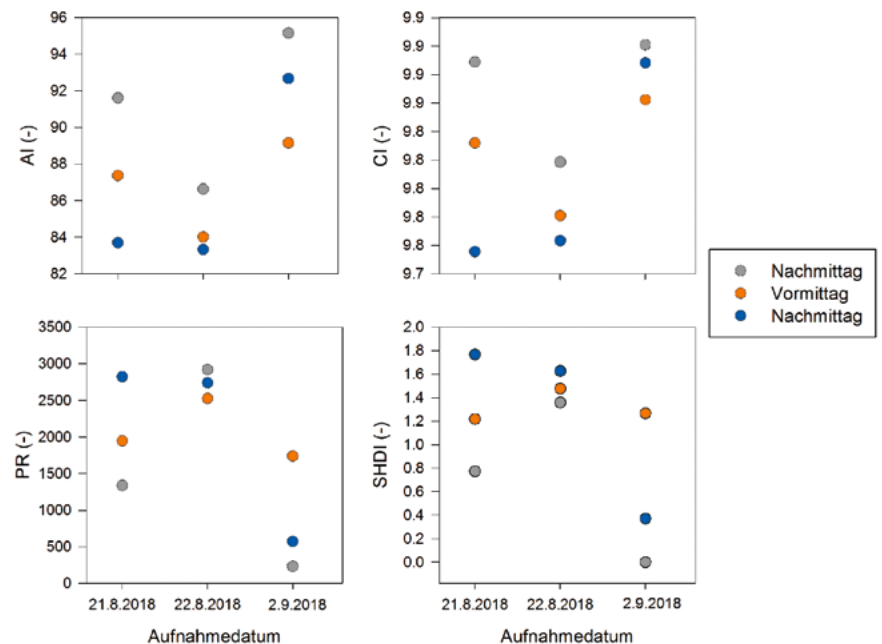


Fig. 4 Ausgewählte Temperaturheterogenitätsmetriken der korrigierten Strahlungstemperatur ( $T_r$ ) am Morgen, Mittag und Nachmittag des 21. und 22. August 2018 (beide sonnig) sowie 2. September 2018 (bewölkt). AI: «Thermal Aggregation Index», CI: «Thermal Cohesion Index», PR: «Thermal Patch Richness», SHDI: «Shannon's Thermal Diversity Index». Die Y-Achsen sind unterschiedlich skaliert.

teter Kühleffekt nicht mit Sicherheit bestätigen.

Die berechneten Metriken der Temperaturheterogenität [16] zeigten eine ähnliche räumliche Ausprägung für die beiden sonnigen Tage, während diese am bewölkten Tag unterschiedlich waren. Im Allgemeinen waren die Pixel mit derselben Temperatur am bewölkten Tag räumlich aggregierter, was sich z. B. in einem höheren *Thermal Aggregation Index* (AI) und *Thermal Cohesion Index* zeigt (Fig. 4). Im Gegensatz dazu liess sich anhand der *Thermal Patch Richness* sowie des *Simpson's und Shannon's Thermal Diversity Index* an den sonnigen Tagen, insbesondere am Vormittag und Nachmittag, eine höhere Temperaturvielfalt der «thermischen Landschaften» nachweisen. Diese räumliche Temperaturheterogenität ist wahrscheinlich auf die höhere Lufttemperatur und die grösseren Umgebungseffekte (z. B. Schatten) an den sonnigen Tagen zurückzuführen.

In Fig. 5 ist der Erwärmungseffekt vom Morgen bis am Nachmittag, der leichte flussabwärts gerichtete Kühleffekt und die höhere thermische Heterogenität der beiden sonnigen Tage deutlich zu erkennen. Rechtsufrig ist die Wassertemperatur etwas wärmer als am linken Ufer (sonnige Tage am Nachmittag). Solche Analysen würden sich auch sehr gut für die Detektion von Kalt- oder Warmwasserzuflüssen eignen.

#### WASSTERTEMPERATURVARIABILITÄT MIT TERRESTRISCHEN WÄRMEBILDERN

Die terrestrisch erfassten Strahlungstemperaturen ( $T_r$ ) korrelierten sehr stark mit den *In-situ*-Temperaturmessungen ( $T_k$ ) mit einem  $r^2$  von 0,99 am sonnigen Tag (Fig. 6) und 0,81 am bewölkten Tag.

$T_r$  lag am sonnigen Tag leicht unterhalb (Mittelwert:  $-0,64 \pm 0,19$  °C; Bereich:  $-0,12$  bis  $-1,18$  °C), am bewölkten Tag leicht oberhalb (Mittelwert:  $0,13 \pm 0,10$  °C; Bereich:  $-0,15$  bis  $0,45$  °C) von  $T_k$ . Diese

Unter- bzw. Überschätzungen sind wahrscheinlich auf die Unterschiede zwischen Wasser- und Lufttemperatur am sonnigen und bewölkten Tag zurückzuführen, die einen Einfluss auf die atmosphärische Absorption und Emission haben.

#### FAZIT

Hauptvorteil der TIR-Aufnahmen gegenüber punktuellen *In-situ*-Messungen ist die grossräumige, kontaktlose und nicht-invasive (d. h. man geht nicht ins Gewässer) Erfassung der Temperatur. Die terrestrischen wie auch die drohnen-gestützten TIR-Aufnahmen haben sich in dieser Studie als wertvolles Werkzeug für die quantitative Beurteilung der Oberflächenwassertemperatur in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erwiesen, wobei die terrestrischen Messungen räumlich beschränkter sind, dafür eine höhere zeitliche Auflösung und bessere Genauigkeit bieten. Beide Erfassungsmethoden

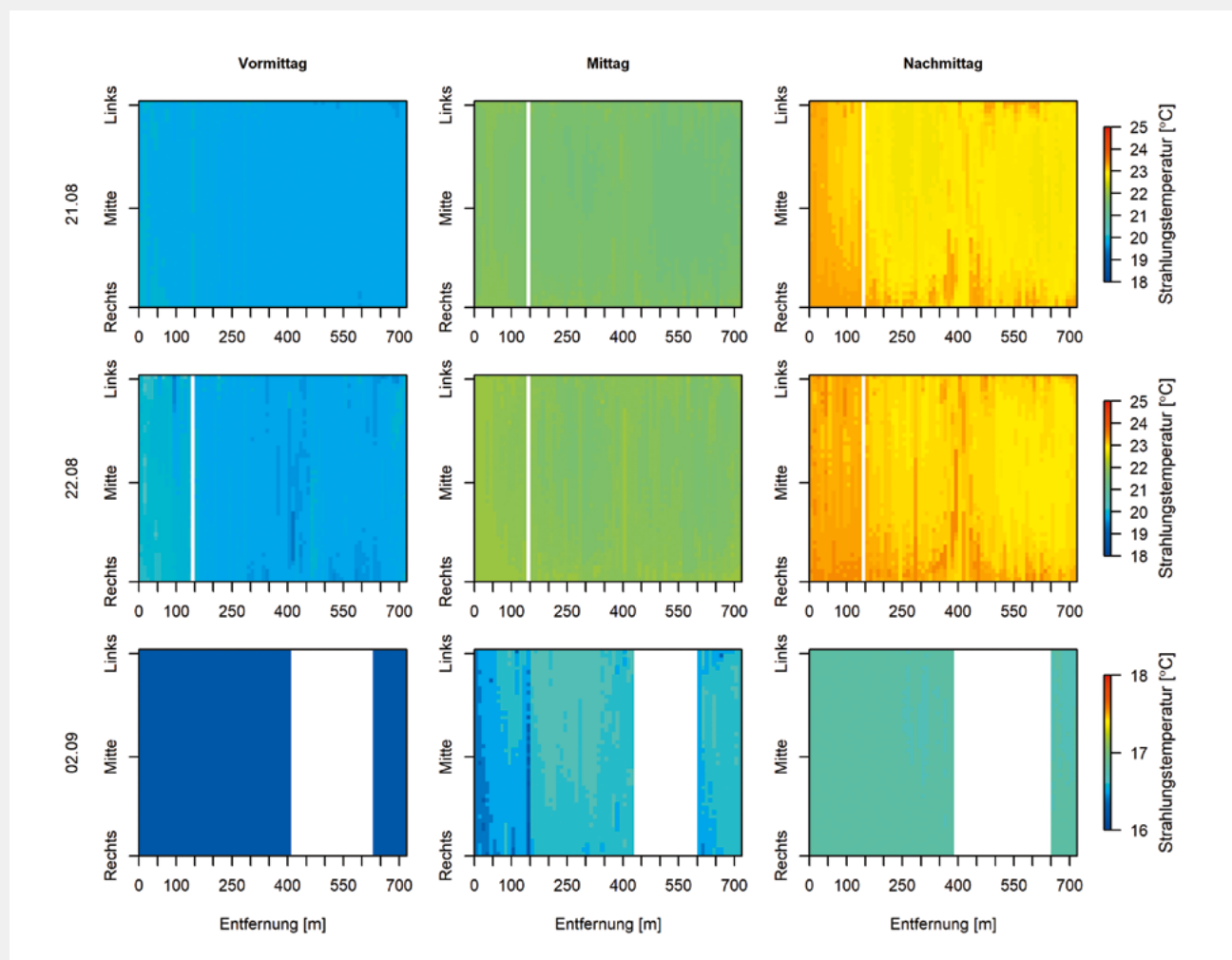


Fig. 5 «Levelplots» der korrigierten thermischen Heterogenität der Strahlungstemperatur ( $T_r$ ) der TIR-Orthofotos (Quertransekte) am Morgen, Mittag und Nachmittag des 21. und 22. August 2018 (beide sonnig) sowie 2. September 2018 (bewölkt). Für die weissen Flächenbereiche sind keine Daten vorhanden (Brücke oder Prozessierungsartefakte). Die Fliessrichtung ist von links nach rechts.



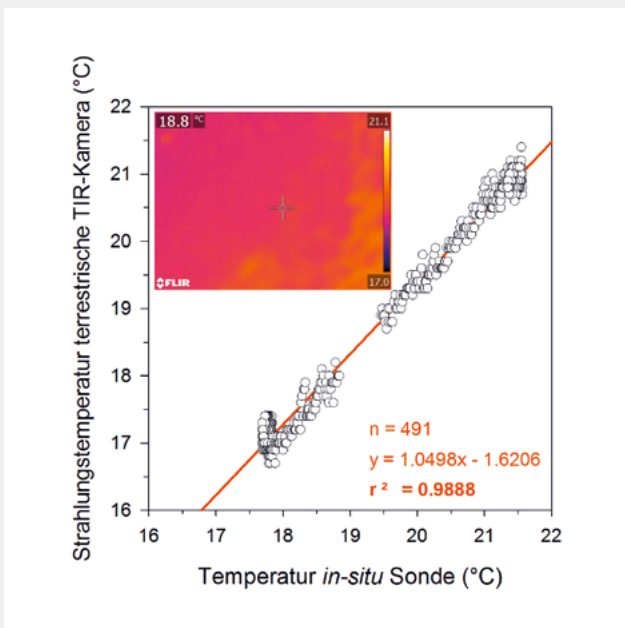


Fig. 6 Vergleich der Strahlungstemperatur ( $T_s$  terrestrisch) mit der kinetischen Temperatur ( $T_k$  in-situ) am 12. August 2018 (7.50 bis 16.50 Uhr; sonnig). Die farbige Abbildung zeigt ein Beispiel eines terrestrischen TIR-Bildes (12.02) mit Messung in der Bildmitte. Ein Ausfall und Austausch der Batterie führte zum Verlust von 9,2% der Daten.

ermöglichen somit je nach Fragestellung einen flexiblen und ergänzenden Einsatz.

#### AUFWAND FÜR DIE VERARBEITUNG DER MULTISPEKTRALEN UND THERMISCHEN DATEN

In dieser Studie wurden mindestens dreimal täglich in kurzem Abstand multispektrale und thermische Daten mit Drohnen erfasst; die Dauer der Aufnahmen betrug pro Flug etwa 20 Minuten (total 21 Flüge; Tab. 1). Der Arbeitsaufwand für den präsentierten Untersuchungsabschnitt (ca. 750 m Fließlänge und 18 m Sohlenbreite) betrug ca. zwei Stunden pro Flug für die Erstellung der multispektralen und eine Stunde für die Erstellung der thermalen Orthofotos aus dem Einzelbildmaterial. Hinzu kommen pro Datenpärchen (multispektral in Kombination mit thermal) die Co-Registrierung (0,5 h), die Oberflächenklassifikation der multispektralen Daten (drei Klassen: Vegetation, Sediment, Wasser) und die Schattendetektion (1 h) sowie die Anwendung der Wassermaske (0,5 h). Je nach Qualität und Anspruch an die Daten können weitere zwei bis drei Stunden für Korrekturen und Analysen pro multispektralen und thermalen Datensatz anfallen. Hinzugerechnet werden müssen allfällige Arbeiten im Feld hinsichtlich Positionierung von *In-situ*-Temperatursonden und allfälliger Kalt- und Warmwasserzuflüsse sowie die Vermessung von topografischen Merkmalen.

#### POTENZIAL VON DROHNEN-GESTÜTZTEN UND TERRESTRISCHEN TIR-AUFNAHMEN

Die Anwendung von drohnen gestützten TIR-Orthofotos und deren Analyse mit den eingesetzten und weiterentwickelten Werkzeugen (z. B. [7, 17]; Fig. 5) eignet sich gut für die Detektion und Quantifizierung von Längs- und Quertemperaturmustern (2D) sowie der zeitlichen Variabilität der Oberflächenwassertemperatur in gut durchmischten Fließgewässern (Fig. 2–5). Hinsicht-

lich Kaltwasserzuflüssen im untersuchten Abschnitt der Glatt lassen sich keine Aussagen machen. Wahrscheinlich waren der Abfluss der kleinen Kaltwasser-Seitenkanäle und die Beschattungseffekte zu gering, um die Wassertemperatur massgeblich zu beeinflussen. Nichtsdestotrotz ist die Infrarotthermographie ein vielversprechendes Verfahren, um kalte (z. B. Grundwasser oder Nebenflüsse) oder warme (z. B. Abwasser oder andere industrielle Wässer) Wasserzuflüsse sowie ökologisch relevante thermische Refugien [4–6, 8, 9, 18, 19] räumlich hoch aufgelöst zu erfassen. Thermalrefugien können für das Überleben vieler aquatischer Organismen einschliesslich der Fische überlebenswichtig sein.

Ergänzend zu den drohnen gestützten Aufnahmen ermöglichte der Einsatz einer terrestrischen TIR-Kamera genaue Messungen der Oberflächenwassertemperatur in hoher zeitlicher Auflösung (Fig. 6). Der Einsatz solcher Kameras an festen Standorten (z. B. Abflussmessstationen) in gut durchmischten Fließgewässern ist für kontinuierliche Messungen und für die Überwachung der Wassertemperatur von räumlich begrenzten Flächen (einige Quadratmeter, je nach Auflösung und Höhe der TIR-Kamera) vielversprechend.

Dennoch, bevor die Eignung und die Zuverlässigkeit solcher TIR-Messungen verallgemeinert werden können, sollten weitere ausführliche Tests über einen längeren Zeitraum und unter verschiedenen meteorologischen und hydrologischen Bedingungen (eventuell auch an verschiedenen Standorten und mit TIR-Kameras verschiedener Qualität) durchgeführt werden.

#### EMPFEHLUNGEN FÜR DIE TEMPERATURERFASSUNG MIT TIR-KAMERAS

TIR-Bilder sind gut geeignet, um relative Unterschiede ( $\pm 0,5$  °C) der Oberflächenwassertemperatur in 2D zu erfassen, jedoch weniger für eine genaue Bestimmung der absoluten Temperatur. Bei der TIR-Anwendung in fluvialen Umgebungen müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden, um die Erfassung qualitativ angemessener Temperaturdaten und geeigneter Analysen zu gewährleisten. Besonders zu erwähnen sind die atmosphärische Absorption und Emission (beeinflusst z. B. von Luftfeuchtigkeit, Wind- und Himmelsstrahlung), die Reflexion von anderen Objekten in Gewässernähe (z. B. Bäume, Gebäude), der Emissionsgrad (d. h. wie viel Wärmestrahlung ein Objekt emittiert im Vergleich zu einem idealen Wärmestrahler, d. h. einem schwarzen Körper), die Oberflächencharakteristik (z. B. Rauigkeit, Trübung), die «Mischpixel» (d. h. terrestrisch-aquatische Bereiche, die in einem einzigen Thermalpixel erfasst werden) und die vertikale Schichtung des Wasserkörpers in Bezug auf die Temperatur, und zwar sohlennah und an der Oberfläche. Ferner sind *In-situ*-Temperaturmessungen für die Validierung und Korrektur der mittels TIR abgeleiteten Strahlungstemperaturen unerlässlich. Darüber hinaus können *In-situ*-Temperaturmessungen ergänzende und kritische Informationen über die langzeitliche thermische Variabilität liefern.

#### AUSBLICK

Die fachlich korrekte TIR-Anwendung eröffnet ein breites Spektrum weiterer Anwendungen, sowohl in der praktischen Gewässererfassung und -beurteilung als auch in der angewandten Gewässerforschung. Hierzu gehören unter anderem:

- die Quantifizierung und ein detailliertes zeitlich-räumlich hochaufgelöstes Monitoring der Oberflächenwassertempe-

ratur in mittleren bis grossen Flüssen und Seen;

- die Kalibrierung, Validierung und Verbesserung von Fliessgewässer-Temperaturmodellen [10, 11, 13];
- die Evaluierung der räumlichen Verbreitung von thermischen Wellen, die durch die Einleitung von Warm- oder Kaltwasser z.B. aus Speicher- (Thermopeaking) oder Atomkraftwerken entstehen können;
- die Wirkungskontrolle von Sanierungs- und Revitalisierungsprojekten, z.B. im Hinblick auf Kaltwasserrefugien für Fische.

Darüber hinaus schreitet die Entwicklung der Drohnen- und Sensortechnologie schnell voran und erhöht damit das Potenzial ihrer Anwendung für häufigere, automatisierte und präzisere thermische Beurteilungen sowie für eine effizientere Kartierung grösserer und komplexerer Gewässerlandschaften.

Die hier vorgestellten Informationen beruhen auf dem ausführlich beschriebenen Bericht der ZHAW [20].

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Caissie, D. (2006): *The thermal regime of rivers: A review*. *Freshwater Biology* 51: 1389–1406
- [2] Tonolla, D. et al. (2010): *Thermal heterogeneity in river floodplains*. *Ecosystems* 13: 727–740
- [3] Lillesand, T.-M. et al. (2008): *Multispectral, thermal, and hyperspectral sensing*. In Lillesand, T.-M. et al. (Eds.), *Remote Sensing and Image Interpretation*, New York: John Wiley & Sons
- [4] Torgersen, C.-E. et al. (2001): *Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams*. *Remote Sensing of Environment* 76: 386–398
- [5] Wawrzyniak, V. et al. (2013): *Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images*. *International Journal of Remote Sensing* 34: 4812–4831
- [6] Deitchman, R.-S. et al. (2009): *Ground-based thermal imaging of groundwater flow processes at the seepage face*. *Geophysical Research Letters* 36: L14401
- [7] Wawrzyniak, V. et al. (2016): *Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing*. *Remote Sensing of Environment* 175: 337–348
- [8] Torgersen, C.-E. et al. (1999): *Multiscale thermal refugia and stream unit associations of chinook salmon in northeastern Oregon*. *Ecological Applications* 9: 301–319
- [9] Tonolla, D. et al. (2012): *Linking fish assemblages and spatio-temporal thermal heterogeneity in a river-floodplain landscape using high-resolution airborne thermal infrared remote sensing and in-situ measurements*. *Remote Sensing of Environment* 125: 134–146
- [10] Cristea, N.-C. et al. (2009): *Use of thermal infrared imagery to complement monitoring and modeling of spatial stream temperatures*. *Journal of Hydrologic Engineering* 14: 1080–1090
- [11] Cardenas, M.-B. et al. (2014): *Analysis of the temperature dynamics of a proglacial river using time-lapse thermal imaging and energy balance modeling*. *Journal of Hydrology* 519: 1963–1973
- [12] Shuman, C.-S. et al. (2003): *A comparison of remote sensing and ground-based methods for monitoring restoration success*. *Restoration Ecology* 11: 325–333
- [13] Loheide, S.-P. et al. (2006): *Quantifying stream-aquifer interactions through analysis of remotely sensed thermographic profiles and in-situ temperature histories*. *Environmental Science and Technology* 40: 3336–3341
- [14] Lebourgeois, V. et al. (2008): *Atmospheric corrections of low altitude thermal infrared airborne images acquired over a tropical cropped area*. *International Geoscience Remote Sensing Symposium, Boston, USA*
- [15] Lee, E. et al. (2016): *Unmanned aerial vehicles (UAVs)-based thermal infrared (TIR) mapping, a novel approach to assess groundwater discharge into the coastal zone*. *Limnology and Oceanography Methods* 14: 725–735
- [16] Faye, E. et al. (2016): *A toolbox for studying thermal heterogeneity across spatial scales: from unmanned aerial vehicle imagery to landscape metrics*. *Methods in Ecology and Evolution* 7: 437–446
- [17] Fricke, K. et al. (2015): *Temperature monitoring along the Rhine River based on airborne thermal infrared remote sensing: estimation of in-situ water temperatures and inflow detection compared to artificial satellite data*. *Journal of Applied Remote Sensing* 9: 095067
- [18] Eschbach, D. et al. (2017): *Thermal-infrared remote sensing of surface water-groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France)*. *Hydrological Processes* 31: 1113–1124
- [19] Fullerton, A.-H. et al. (2018): *Longitudinal thermal heterogeneity in rivers and refugia for coldwater species: effects of scale and climate change*. *Aquatic Sciences* 80: 3
- [20] Tonolla, D. et al. (2019): *Characterization of spatio-temporal thermal heterogeneity and riparian shading in the Glatt River using high-resolution thermal infrared and multispectral remote sensing*. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN). ZHAW. [www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/studien.html](http://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/studien.html)

## > SUITE DU RÉSUMÉ

drone pouvaient surestimer ou sous-estimer les mesures in situ. Des divergences entre la température de l'eau et de l'air durant ces jours avec une influence variée sur l'absorption et l'émission atmosphériques des rayonnements pourraient être une cause. Une correction avec des données de température in situ a permis de réduire ces divergences jusqu'à  $\pm 0,5$  °C. Les orthophotographies TIR prises avec le drone et leurs analyses ont permis d'identifier un effet de réchauffement du matin à l'après-midi, un léger effet de refroidissement vers l'aval de la rivière et une hétérogénéité thermique plus élevée durant les jours ensoleillés. De tels relevés et analyses seraient appropriés pour réaliser une identification spatiale en haute définition des arrivées d'eau froide (p. ex. eaux souterraines ou affluents) ou chaude (p. ex. eaux usées ou autres eaux industrielles) ainsi que des refuges thermiques pertinents écologiquement pour les poissons. Outre l'absorption et l'émission atmosphériques, il faut considérer d'autres aspects lorsque l'on a recours à la thermographie infrarouge dans les environnements fluviaux, comme la réflexion d'autres objets à proximité des cours d'eau ou le degré d'émission et les caractéristiques de la surface de l'eau. Cela permet de garantir la qualité de la collecte des données de température et la pertinence des analyses. De plus, les mesures de température in situ sont indispensables pour la validation et la correction des températures de rayonnement déduites de la thermographie infrarouge. Malgré la réduction des erreurs induite par ce procédé, il faut garder un regard critique, en particulier sur la collecte de données absolues de température aquatique.



## infraBase – die führende Software für den Unterhalt von:

Wasserversorgungen

Gasversorgungen

Fernwärme

**Einfach. Übersichtlich. Komplett.**



- Komplette W12 Erfassung in wenigen Stunden, ohne W12 Vorkenntnisse
- Vollständiger Ersatz für den QS Ordner aus Papier
- Software für den Wartungsunterhalt samt QS mit dem Tablet
- Verschiedene Module wie Dokumentenverwaltung, Jahresplaner, Bilddokumentation, Labordaten, Anlagebuchhaltung, Budget usw.

Steht bei Ihnen in nächster Zeit eine QS-Überarbeitung an? Wozu viel Zeit und Geld in einen QS-Ordner aus Papier investieren, wenn es mit infraBase viel einfacher und günstiger ist? Gerne unterstützen wir Sie bei der Datenerfassung, die dank unserer Spezialwerkzeuge in Rekordzeit erledigt ist!

**Interessiert? Gerne zeigen wir Ihnen infraBase unverbindlich.**

*infra***Base**

[www.infrabase.ch](http://www.infrabase.ch)